

Т. В. Ципуштанова, А. П. Лужецкая, В. А. Поддубный

## ОЦЕНКА АЭРОЗОЛЬНОГО РАДИАЦИОННОГО ФОРСИНГА АТМОСФЕРЫ В ЕКАТЕРИНБУРГЕ, ТОМСКЕ И BRATTS LAKE (КАНАДА) ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ МОНИТОРИНГА «AERONET»

Статья посвящена статистическому анализу связей прямого аэрозольного радиационного форсинга в коротковолновой области спектра с оптическими и микрофизическими характеристиками атмосферного аэрозоля. Построены линейные однофакторные и многофакторные статистические полуэмпирические модели для оценки аэрозольного радиационного форсинга.

**Ключевые слова:** аэрозольный радиационный форсинг, аэрозоль, статистический многофакторный анализ.

The article is devoted to linear statistical semi-empirical models for estimating aerosol radiation forcing (ARF). On the basis of the results of measurements of radiative and microphysical characteristics of aerosol the values of empirical coefficients are found. The article gives the results of comparison between linear single-factor models and multifactor models.

**Keywords:** aerosol radiation forcing, aerosol, statistical multivariate analysis.

### Введение

Атмосфера является одним из самых динамичных компонентов окружающей природной среды. Состояние атмосферы Земли определяется множеством физических характеристик и процессов, химическим составом и другими факторами. Атмосфера представляет собой смесь различных газов и аэрозолей, которые играют важную роль в энергетическом балансе планеты, рассеивая и поглощая приходящее солнечное и исходящее земное излучение, а также изменяя микрофизические и радиационные свойства облаков.

Для количественной оценки прямого воздействия аэрозоля на радиационный бюджет атмосферы широко используется величина, называемая аэрозольным радиационным форсингом (АРФ) [1]. Обычно, прямой радиационный форсинг атмосферных аэрозолей  $\Delta\Phi$ , определяется как изменение в балансе радиационных потоков  $F$  атмосферы следующего вида:

$$\Delta\Phi = (F^{\downarrow a} - F^{\uparrow a}) - (F^{\downarrow 0} - F^{\uparrow 0}) \quad (1)$$

где стрелки обозначают направление потоков  $\downarrow$  — нисходящей и  $\uparrow$  — восходящей радиации; индекс «a» соответствует потокам радиации рассчитанным (или измеренным) в присутствии аэрозоля в атмосфере; индекс «0» — потокам радиации в условиях «базовой» атмосферы. В качестве базовых условий отсчета форсинга

обычно используют либо атмосферу доиндустриальной эпохи, либо «фоновую» атмосферу без антропогенного аэрозоля, или атмосферу с полным отсутствием аэрозоля.

В зависимости от приближений, используемых в климатических моделях, существует множество уточняющих вариаций общего определения радиационного форсинга. В любом случае, для оценки АРФ используют как данные измерений потоков радиации и свойств атмосферного аэрозоля, так и результаты численного моделирования процессов переноса солнечного и земного излучения в атмосфере.

В ряде случаев результаты численных решений уравнений переноса параметризуют, представляя радиационный форсинг в виде простых функций от определяющих параметров. Для парниковых газов в качестве определяющего параметра используют концентрации примеси в атмосфере [2], а для аэрозолей на локальном или региональном масштабах — аэрозольную оптическую толщину (АОТ) [3, 4], являющуюся мерой общего содержания аэрозольных частиц в атмосфере.

В отличие от газовой примеси, атмосферный аэрозоль не может быть описан только одним параметром (концентрацией или АОТ) — необходимо знать также функцию распределения частиц по размерам, химический состав, оптические свойства и другие характеристики. Однако до последнего времени, в простых формулах параметризации использовались лишь однофакторные линейные или нелинейные зависимости АРФ от величины АОТ, что представляется существенным ограничением.

Задача настоящего исследования — разработка полуэмпирических моделей связей прямого аэрозольного радиационного форсинга в коротковолновой области спектра на верхней границе атмосферы с оптическими характеристиками атмосферного аэрозоля по данным измерений на трех континентальных пунктах мониторинга, расположенных в России и Канаде.

### **Исходные данные и корреляционный анализ**

На сегодняшний день, самой информативной наземной системой мониторинга свойств атмосферного аэрозоля является сеть почти двухсот спектральных солнечных фотометров «AERONET» (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>), распределенных по всему миру. В рамках этой сети мониторинга на основе единой приборной базы и единой системы калибровки, по единым алгоритмам обработки результатов измерений восстанавливается более десятка наиболее важных характеристик атмосферного аэрозоля [5, 6]. Массив результатов текущих измерений и архив данных мониторинга за предшествующие годы находятся в открытом доступе, обеспечивая наилучший, наиболее полный источник исходной информации для решения поставленной задачи.

В качестве входных данных для статистического анализа и построения полуэмпирических моделей в настоящем исследовании используются результаты измерений, полученные в трех пунктах мониторинга

«AERONET»: Екатеринбург, Томск и Bratts Lake (Канада), классифицируемые в работе [7] как континентальные.

При разработке статистических моделей АРФ на верхней границе атмосферы, в качестве аргументов таких моделей должны присутствовать статистически независимые предикторы. На основе статистического анализа, парных коэффициентов корреляций множества измеряемых параметров аэрозоля для построения полуэмпирических моделей были выбраны наиболее статистически значимые независимые характеристики аэрозоля. Установлено, что потоки коротковолновой радиации, восстанавливаемые по данным спектральных измерений как прямого, так и рассеянного солнечного излучения, существенно зависят от следующих параметров: аэрозольная оптическая толща  $\tau_\lambda$  для длины волны 0,5 и 0,675 мкм; спектральное альbedo однократного рассеяния аэрозоля  $\omega_\lambda$  для длины волны 0,675 мкм; альbedo подстилающей поверхности  $A$  (АПП) для длины волны 0,675 мкм.

В перечень исходных данных для построения моделей входят также оценки спектральных и широкополосных потоков солнечной радиации, прямого аэрозольного радиационного форсинга в коротковолновом диапазоне солнечного излучения (0,2...4 мкм) на верхней границе атмосферы, задаваемый формулой

$$\Delta F_e = (F_e^{\uparrow 0} - F_e^{\uparrow a}) \quad (2)$$

где индексом «в» обозначен верхний уровень атмосферы, а в качестве начала отсчета АРФ используется модельная атмосфера с полным отсутствием аэрозоля.

В настоящем исследовании использовались результаты измерений, прошедшие окончательный контроль качества, т. е. данные уровня 2 (по классификации «AERONET», см. [8]), полученные за десятилетний период измерений с 2004 по 2014 гг. Полное количество членов в таких выборках составило 702 для Екатеринбурга, 1271 для Томска и 3177 для Bratts Lake. В связи с тем, что при решении обратных задач восстановление альbedo однократного рассеяния и комплексного показателя преломления надежно осуществляется лишь для относительно высоких значений АОТ, дополнительная фильтрация исходных данных приводит к сокращению итоговых выборок до 95 членов для Екатеринбурга, 73 для Томска и 81 для Bratts Lake.

По данным «AERONET» на верхней границе атмосферы АРФ может принимать как отрицательные, так и положительные значения в диапазоне от +18 до -106 Вт/м<sup>2</sup>, при медианном значении -48,2 Вт/м<sup>2</sup> для Екатеринбурга. Для Томска диапазон значений от +80 до -86 при медианном значении -25 Вт/м<sup>2</sup>. Для Bratts Lake диапазон значений от -21,2 до -54,3 при медианном значении -30 Вт/м<sup>2</sup>. Отметим, что положительные значения АРФ свидетельствует о нагреве атмосферы, а отрицательные — о ее выхолаживании.

### Однофакторная регрессионная модель

Простейшей статистической моделью АРФ является уравнение линейной регрессии, в котором единственным предиктором служит величина АОТ на длине волны 0,5 мкм, а влияние всех остальных оптических и микрофизических параметров аэрозоля учитывается с помощью аддитивной константы. Для построения однофакторной регрессионной модели использовались данные измерений, выполненных только в теплый период времени, при отсутствии снежного покрова. В этом случае выполняется условие — АПП не превышает значения 0,4. В результате, итоговая выборка для однофакторной линейной модели составила следующие значения: Екатеринбург — 91 член выборки, Томск — 65, Bratts Lake — 81. Такой подход вполне допустим, т. к. АРФ наиболее сильно коррелирует именно с АОТ, измеряемой только в теплые периоды года. На множестве исходных данных, объединенных для всех трех континентальных пунктов мониторинга, методом наименьших квадратов были найдены значения коэффициентов регрессионных линейных зависимостей, которые оказались статистически значимыми на уровне значимости 0,05. В результате получена статистическая полуэмпирическая модель аэрозольного форсинга на верхней границе атмосферы

$$\Delta F_{\text{в}} = -47,6 \cdot \tau_{0,5} - 7,1, \text{ при } R^2 = 0,89 \quad (3)$$

где  $R^2$  — коэффициент детерминации, определяющий качество регрессионной модели.

Тестирование полученной модели для выборок, соответствующих отдельным пунктам мониторинга приводит к следующим достаточно высоким значениям коэффициента детерминации  $R^2$ : Екатеринбург — 0,89; Томск — 0,84; Bratts Lake — 0,76.

На рис. 1 показаны исходные значения величин АРФ на верхней границе атмосферы, а также такие найденные линейные зависимости, как функции от АОТ на длине волны 0,5 мкм. Как видно из рисунка, линейная регрессия довольно хорошо описывает множество значений АРФ (при высоких значениях АОТ).

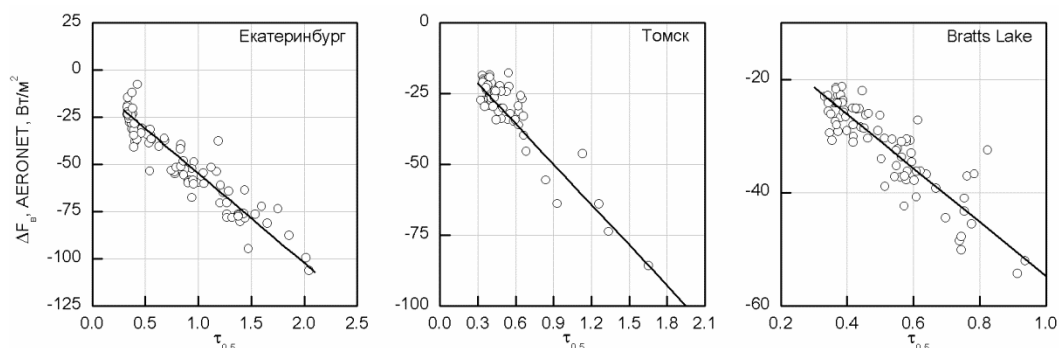


Рис. 1. Зависимости АРФ от величины  $\tau_{0,5}$  для однофакторных линейных регрессионных моделей на верхней границе атмосферы, уравнение (3)

### Многофакторная регрессионная модель

Повышения качества модели можно достигнуть путем учета других характеристик аэрозоля, т. е. включением в уравнение модели дополнительных предикторов. В отличие от однофакторной модели, в данном случае можно попытаться построить более универсальную модель на основе результатов всех измерений без выделения различных сезонов года. В результате, на проанализированном множестве всех исходных данных (при произвольных альбедо подстилающей поверхности) получена следующая статистическая полуэмпирическая линейная многофакторная модель АРФ:

$$\Delta F_g = -56,2 \cdot \tau_{0,675} - 130,8 \cdot \omega_{0,675} + 116,4 \cdot A_{0,675} + 98,9, \text{ при } R^2 = 0,94. \quad (4)$$

Исследование многофакторной модели для выборок, соответствующих отдельным пунктам мониторинга приводит к следующим достаточно высоким значениям коэффициентов детерминации: Екатеринбург и Томск —  $R^2 = 0,95$ ; Bratts Lake —  $R^2 = 0,66$ .

Как и ожидалось, коэффициент детерминации увеличился по сравнению с простой (однофакторной) регрессионной моделью (см. формулу (3)), но только для Екатеринбурга и Томска. В пункте Bratts Lake коэффициент детерминации уменьшился. Это можно объяснить тем, что измерения в этом пункте мониторинга проводились исключительно в летний период и АПП изменяется незначительно от 0,06 до 0,17 ( $\Delta A_{0,675} = 0,11$ ). Для сравнения, в Томске АПП меняется от 0,06 до 0,72 и  $\Delta A_{0,675} = 0,66$ , т. е. общий диапазон изменения АПП в 6 раз больше, чем в Bratts Lake.

Рис. 2 демонстрирует результаты сравнения исходных данных АРФ по «AERONET» и соответствующих величин, рассчитанных по многофакторной статистической модели (4).

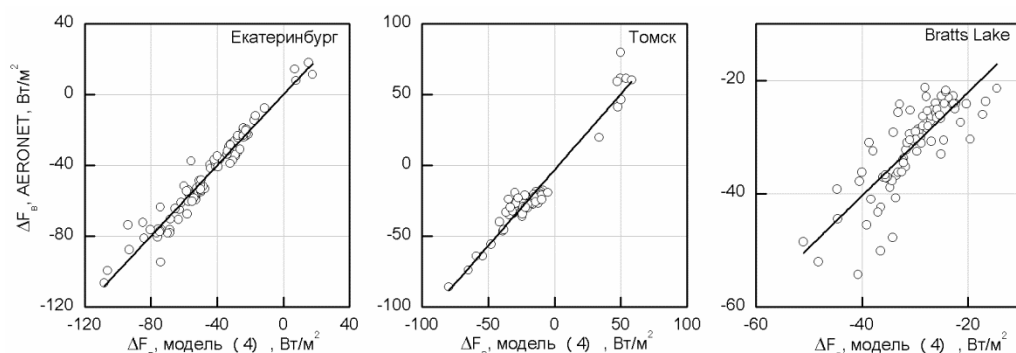


Рис. 2. Диаграммы рассеяния, рассчитанные по данным AERONET, и модели множественной линейной регрессии (4) для АРФ на верхней границе атмосферы

Таким образом, выполненный статистический анализ показывает, что АРФ на верхней границе атмосферы определяется аэрозольной оптической толщиной, альбедо однократного рассеяния, альбедо подстилающей поверхности.

Предлагаемые линейные простые многофакторные регрессионные модели АРФ, как всякие статистические модели, «наилучшим» образом описывают множество исходных данных только в том диапазоне параметров аэрозоля, внутри которого были найдены коэффициенты модели. Использование этих моделей вне указанного диапазона значений предикторов может привести к получению некорректных результатов. Кроме того, линейные модели не имеют физического содержания. Например, при стремлении к нулю количества аэрозоля в атмосфере ( $\tau \rightarrow 0$ ) эти модели не обеспечивают стремление к нулю значений АРФ. Нелинейный характер физической взаимосвязи АРФ с определяющими их характеристиками аэрозоля в таких моделях не учитывается, что приводит к необходимости выделять узкие диапазоны изменения параметров (например, выделять классы аэрозоля, сезоны года и др.), а внутри них разрабатывать свои модели.

### Выводы

Выполнен статистический анализ связей прямого аэрозольного радиационного форсинга в коротковолновой области спектра с оптическими и микрофизическими характеристиками атмосферного аэрозоля. Для этого выбраны три пункта мониторинга сходных по климатическим условиям окружающей природной среды, данные результатов измерений характеристик аэрозоля которых представлены в информационной системе «AERONET».

Предложено использовать многофакторный регрессионный анализ для построения простых моделей «АРФ — параметры аэрозоля», поскольку характеристика атмосферного аэрозоля с помощью единственного параметра (обычно это АОТ) не является полной. Показано, что многофакторные модели имеют более высокое качество, т. е. более высокие коэффициенты детерминации по сравнению с моделями, связывающими АРФ только с аэрозольной оптической толщиной.

### Благодарность

Авторы работы выражают благодарность С. А. Бересневу, С. Ю. Горде (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия); Т. Б. Журавлевой, С. М. Сакерину, М. В. Панченко, Д. М. Кабанову, (Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия); B. N. Holben, A. V. Smirnov (Центр космических полетов Годдарда (GSFC/NASA), Greenbelt, USA).

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта фундаментальных исследований ИПЭ УрО РАН № 15-ИПЭ-03 и проекта фундаментальных и поисковых научных исследований, выполняемого в рамках соглашения о сотрудничестве УрФУ и УрО РАН, «Моделирование процессов переноса атмосферного аэрозоля».

### Литература

1. Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M., Collins W., Fuglestad J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T., Zhang H. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovern-*

- mental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2013. P. 659–740.
2. Ramaswamy V., Boucher O., Haigh J., Hauglustaine D., Haywood J., Myhre G., Nakajima T., Shi G. Y., Solomon S. Radiative Forcing of Climate Change // Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2001. P. 349–416.
  3. Procopio A. S., Artaxo P., Kaufman Y. J., Remer L. A., Shafer J. S., Holben B. N. Multiyear Analysis of Amazonian Biomass Burning Smoke Radiative Forcing of Climate // Geophys. Res. Letters. 2004. Vol. 31. P. L3108.
  4. Ситнов С. А., Горчаков Г. И., Свириденков М. А., Копейкин В. М., Пономарева Т. Я., Карпов А. В. Влияние атмосферной циркуляции на эволюцию и радиационный форсинг дымового аэрозоля на европейской части России летом 2010 г. // Исследование Земли из космоса. 2013. № 2. С. 28–41.
  5. Dubovik O., King M. A Flexible Inversion Algorithm for Retrieval of Aerosol Optical Properties from Sun and Sky Radiance Measurements // J. Geophys. Res. D. 2000. Vol. 105. No. 16. P. 20673–20696.
  6. Dubovik O., Holben B., Eck T., Smirnov A., Kaufman Y., King M., Tanré D., Slutsker I. Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol Types Observed in Worldwide Locations // J. Atmos. Sci. 2002. Vol. 59. No. 3. P. 590–608.
  7. Garcia O. E., Diaz J. P., Exposito F. J., Diaz A. M., Dubovik O., Dermian Y., Dubuisson P., Roger J.-C. Shortwave Radiative Forcing and Efficiency of Key Aerosol Types Using AERONET data // Atmos. Chem. Phys. 2012. Vol. 12. P. 5129–5145.
  8. Сакерина С. М. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2012. 482 с.